

可控励磁磁悬浮直线同步电机磁热耦合研究^{*}

代雅洁, 蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 针对用于驱动数控机床的可控励磁直线磁悬浮同步电机特殊结构, 对磁热耦合机理进行研究。分析电机在不同电枢电流时磁场对温升的影响, 建立该电机二维温度场中热传导的微分方程、热对流的牛顿冷却公式以及温度场的边界条件; 确定电机不同材料的导热系数及对流换热系数, 给出对流换热系数的解析表达式。采用 ANSYS 有限元仿真磁热耦合分析方法, 分析电机主要热源, 应用 ANSYS Maxwell 软件计算其定子、转子损耗, 以此作为电机热源导入 Workbench 软件对其进行热分析, 得到该电机通入不同电枢电流时的温度分布云图。仿真结果表明, 可控励磁磁悬浮直线同步电机内发热主要集中在绕组处, 随电枢电流的增加而增大。温度场计算数据可为电机设计提供依据。

关键词: 直线同步电机; 温度场; 磁热耦合; 损耗; 有限元分析

中图分类号: TM 359.4; TP 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)12-0054-06

doi: 10.12177/emca.2020.156

Research on Magnetic-Thermal Coupling of Controllable Excitation Magnetic Levitation Linear Synchronous Motor^{*}

DAI Yajie, LAN Yipeng

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at the special structure of the controllable excitation magnetic levitation linear synchronous motor used to drive the CNC machine tool, the magnetic-thermal coupling mechanism is studied. The influence of the magnetic field on the temperature rise of the motor at different armature currents is analyzed. The differential equation of heat conduction in the two-dimensional temperature field of the motor, the Newtonian cooling formula of heat convection and the boundary conditions of the temperature field are established. The thermal conductivity and convective heat transfer coefficient of different materials of the motor are determined, and the analytical expression of the convective heat transfer coefficient is given. Using ANSYS finite element simulation method in the magnetic-thermal coupling analysis, the main heat sources of the motor are analyzed. The ANSYS Maxwell software is used to calculate the motor stator and rotor losses, which are used as the motor heat source and imported into the Workbench software for thermal analysis to obtain the temperature distribution cloud diagram of the motor when different armature currents are applied. The simulation results show that the heat in the controllable excitation magnetic levitation linear synchronous motor is mainly concentrated in the windings, and the temperature increases with the increase of the armature current. The calculated data of temperature field can provide the basis for motor design.

Key words: linear synchronous motor; temperature field; magnetic-thermal coupling; loss; finite element analysis

收稿日期: 2020-08-16; 收到修改稿日期: 2020-10-04

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51575363)

作者简介: 代雅洁(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电机及其控制。

蓝益鹏(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制。

0 引言

可控励磁直线磁悬浮同步电机是一种经过直线电机设计改进的特种电机,可以从根本上改善传统进给系统的缺陷,产生水平推力实现直接驱动和可控悬浮力实现磁悬浮。通过调节励磁电流改变气隙磁场,控制垂直方向的磁拉力,拉力等于重力时,使平台悬浮于导轨之上,通过改变电枢绕组的电流来改变水平方向的电磁推力。通过适当的控制策略,使悬浮气隙保持恒定,消除了进给平台与固定导轨之间的摩擦。因此,可控励磁直线同步电机(CELSM)磁悬浮进给平台具有微进给、精度高、响应速度快等特点,具有良好的应用前景。

在工作过程中,线圈通电,绕组产生损耗。这些损耗几乎全部转变为热能,使电机内部温升高^[1]。因此,通入线圈的电枢电流对温升影响很大。温升超过极限,会加速线圈及硅钢片之间的绝缘材料老化,烧毁电机,也会影响运动平台的精确度。因此,为了保持平台长时间稳定运行,使电机温度在允许范围内,是急需解决的问题。近年来,常采用有限元法研究电机的热分析。文献[2]通过解析法与有限元法相结合方式,对无铁心永磁直线电机进行磁场分析和温度场分析。文献[3]建立三维温度场耦合的计算模型,并采用有限元法计算了额定工况下无刷励磁同步发电机的温度分布。

为了研究电枢电流对 CELSM 损耗及温度的影响,本文通过建立电机温度场有限元模型,采用 Maxwell 和 Workbench 软件结合的单向耦合方法,电机额定电枢电流为 3 A,对通入 0、1.5、3.0 A 电枢电流的可控励磁直线磁悬浮同步电机进行温度场仿真,研究并分析通入不同电枢时,对电机温度场分布的影响^[4-5]。

1 可控励磁直线磁悬浮同步电机的结构和工作原理

CELSM 驱动的磁悬浮进给平台结构图如图 1 所示。

CELSM 采用单边长定子结构,次级定子上缠绕有通入直流电流的励磁绕组,会在气隙中产生励磁磁场,励磁磁场与转子铁心之间产生了磁悬

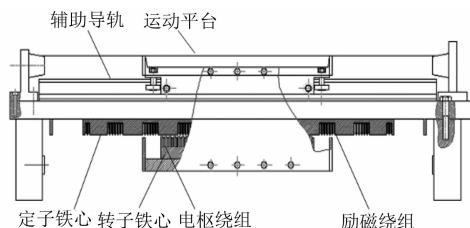


图1 CELSM 磁悬浮进给平台结构二维图

浮力,当悬浮力等于平台重力时,可使平台稳定悬浮在导轨上。悬浮高度通过电涡流传感器测量,可通过改变调节励磁电流的大小进行控制。初级转子上缠绕有通入三相对称交流电流的电枢绕组,可在气隙中产生行波磁场,行波磁场与励磁磁场相互作用产生水平方向的电磁推力,进给平台受到电磁推力的影响作直线运动^[6]。

2 二维温度场数学模型

根据传热学基本知识,热量的传递包括热传导、热对流和热辐射^[7]。本文所研究的可控励磁磁悬浮直线电机,热量的传递方式主要包括热传导和热对流。热辐射对该电机的热量传递较少,因此本文不考虑热辐射对电机的影响。

热传导是指物体接触表面有不同温度,在传递过程中需要通过介质,热传导的传递介质包含固体、液体和气体。在二维温度场分析中,热传导的微分方程为^[8]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + P = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: λ 为导热系数; T 为温度; P 为单位体积产生的热量; ρ 为密度; c 为比热容。

稳态时, $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ 。则式(1)可简化为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + P = 0 \quad (2)$$

热对流是由流体运动引起的传热过程,通常与热传导共同作用来实现热量的传递。热对流的必要条件为存在流体,且有温度差,可以用牛顿冷却公式来描述^[9]:

$$Q = \alpha \cdot \Delta t \cdot S \quad (3)$$

式中: Q 为流体在单位时间内单位面积上的热量; α 为对流换热系数; Δt 为固体表面与流体表面的温度差; S 为外表面接触面积。

为了简化数值分析,作以下假设:

(1) 平台沿导轨方向连续分布;
(2) 环境温度恒定为 25 °C,不受电机散热的影响;

(3) 不考虑热辐射对电机的影响;

(4) 忽略交流谐波磁场引起的附加铁损耗。

在进行温度场求解之前,要施加边界条件。根据传热学基本知识,三类热交换方式在数值仿真计算中体现为温度场边界条件^[10]:

(1) 温度边界条件。若在边界面上的温度是定值:

$$T = T_0 \quad (4)$$

式中: T_0 为初始温度。

(2) 热流边界条件。若给定边界条件上的热流密度 q ,即给定法线方向上的温度梯度,称为热流边界条件^[11]:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad (5)$$

式中: k 为表面的法向量方向; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为温度梯度; q 为热流密度。

当表面上没有热量流过,达到稳定平衡,即绝热边界条件, $q=0$ 。

(3) 对流换热边界条件。若已知电机边界的温度 T 、电机周围流体的温度 T_f ,以及边界与流体之间的对流换热系数 α ,则由牛顿冷却定律可表示对流换热边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_f) \quad (6)$$

式中: T_f 为电机周围流体的温度。

3 二维温度场热参数

3.1 导热系数

金属材料的导热系数随温度变化而变化^[8]。本文研究的可控励磁磁悬浮直线同步电机在一定温度范围内金属材料的导热系数变化较小,一般可认为导热系数是常数。

绕组线圈外涂有绝缘漆膜等,因此对绕组线圈作等效热处理。绝缘材料的等效导热系数 λ_{eq} 通过式(7)计算^[12]:

$$\lambda_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (7)$$

式中: δ_i 为各导热体厚度; λ_i 为各导热体导热系数。

因为绝缘材料的导热系数小于绕组的导热系数,所以可忽略绕组导热系数,将绝缘材料的导热系数看作绕组等效导热系数^[13]。

本文电机在求解过程中,涉及到的材料性质如表 1 所示。

表 1 材料性质

组件	导热系数/ (W·K ⁻¹ ·m ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
硅钢片	44.2	7 800	460
绕组	380	8 900	390
空气	0.002 3	1.29	1 004
绝缘材料	0.16	1 700	1 340

3.2 对流换热系数

本文研究的 CELSM,没有冷却装置,采用自然对流散热,冷却介质为空气。不考虑电机表面尺寸等影响因素,可认为电机表面的散热系数仅与空气的流速相关。根据经验公式,当空气流速在 5~25 m/s 的范围内,对流换热系数 α 与空气流速 ν 之间的关系^[14]为

$$\alpha = \alpha_0(1 + k\sqrt{\nu}) \quad (8)$$

式中: α_0 为静止空气中表面的换热系数; k 为考虑气流吹拂效率的系数; ν 为空气吹拂表面的速度。

通入不同的电枢电流会导致转子的运动速度不相同,经计算对流换热系数如表 2 所示。

表 2 对流换热系数

电枢电流/A	0	1.5	3.0
对流换热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	14.20	24.14	28.40

4 可控励磁直线磁悬浮同步电机的热源

电机中绕组和铁心部分会产生损耗,通过热量的形式,一部分经热传导和热对流的形式向周围空气传递散热,其余部分留在电机内部,使电机温升提高。因此,需要精确地计算电机的各部分的损耗,损耗分布对于电机温度场分布的精确计算十分关键^[15]。电机的主要热源为电枢绕组损

耗(转子)、励磁绕组损耗(定子)、转子铁心损耗、定子铁心损耗。

4.1 绕组损耗

绞线形式的线圈直径较小,可忽略集肤效应对绕组损耗的影响。可控励磁磁悬浮直线电机有电枢绕组和励磁绕组,通过焦耳—楞次定律,分别产生电枢绕组的铜耗 P_p 和励磁绕组的铜耗 P_c [16]:

$$\begin{cases} P_p = 3I_p^2 R_p \\ P_c = I_c^2 R_c \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_p 为电枢电流有效值; R_p 为电枢绕组电阻; I_c 为励磁电流有效值; R_c 为励磁绕组电阻。

由式(9)可得,电枢电流对铜耗影响最大,因此本文研究不同电枢电流对于电机的影响。电流越大,电机运行时的铜耗就越高。其中,电阻 R 的计算式 [17] 为

$$R = \frac{\rho L_{av} N}{a \pi (d/2)^2} \quad (10)$$

式中: ρ 为导体材料的电阻率; L_{av} 为线圈平均全长; N 为每相串联匝数; a 为相绕组的并联支路数; d 为导线裸线直径。

计算可得 R_p 为 3.47Ω , R_c 为 18Ω 。

4.2 铁心损耗

基本铁耗是由磁场在铁心内发生变化产生的。根据铁磁材料在交变磁场下产生损耗的机理不同,以及铁损耗分离理论,铁心损耗包括磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗 [14]。本文研究的电机频率为 10 Hz ,忽略谐波磁场引起的附加损耗。在正弦磁通下,频率范围内的铁耗 P_{Fe} 为

$$P_{Fe} = K_h f (B_m)^2 + K_c (f B_m)^2 + K_e (f B_m)^{1.5} \quad (11)$$

式中: K_h 为磁滞铁心损耗系数; f 为频率; B_m 为交流磁通分量的幅值; K_c 为涡流铁心损耗系数; K_e 为附加的铁心损耗系数。

5 有限元仿真及分析

使用 ANSYS 电磁场有限元仿真软件建立可控励磁直线磁悬浮同步电机有限元模型,如图 2 所示。

通过 ANSYS 软件可以较为精确地计算电机定、转子瞬时的损耗。用 ANSYS Maxwell 有限元仿真软件对电机的铁耗、绕组铜耗分别仿真计算。



图 2 电机有限元模型

将硅钢片的 B - P 曲线、密度、厚度、电导率等参数导入软件进行拟合计算,得到硅钢片在额定频率下的损耗系数,进行铁耗计算。电机通入 0 、 1.5 、 3.0 A 电枢电流时,损耗结果分别如图 3~图 5 所示。

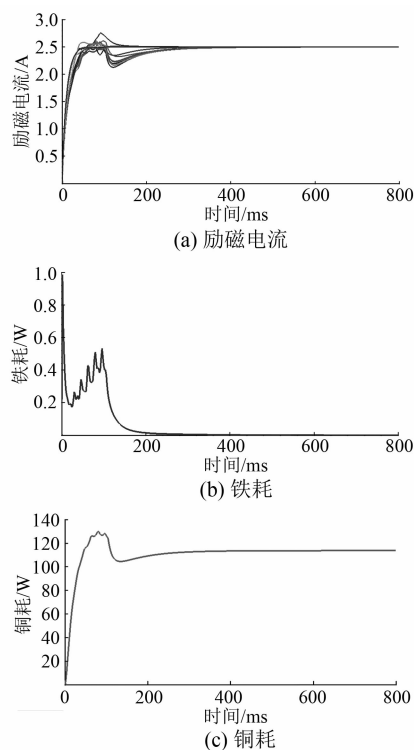


图 3 电枢电流 0 A 时电机的损耗仿真结果

从图 5 可知,通入不同电枢电流,电机损耗也不同。随着电枢电流的增加,电机铜耗和铁耗出现不同程度的增大。通入电流时,损耗迅速增加,产生突变,在 $300 \sim 800 \text{ ms}$ 趋于稳定,形成规律的波动。

铁心损耗由交变磁场产生,根据式(11)铁耗 P_{Fe} 受磁通密度影响,磁滞损耗、涡流损耗与磁密的平方成正比。电枢电流为 0 A 时,电机处于稳定悬浮状态,磁通密度基本不变,频率为零,铁耗趋近于零。电枢电流 1.5 A 与 3.0 A 时,产生行波磁场,电机齿、槽的磁通密度一直在变化,因此铁耗波动。电机稳定时,通入 1.5 A 电枢电流,电机铁耗波动范围为 $0.80 \sim 1.25 \text{ W}$,有限元计算平均

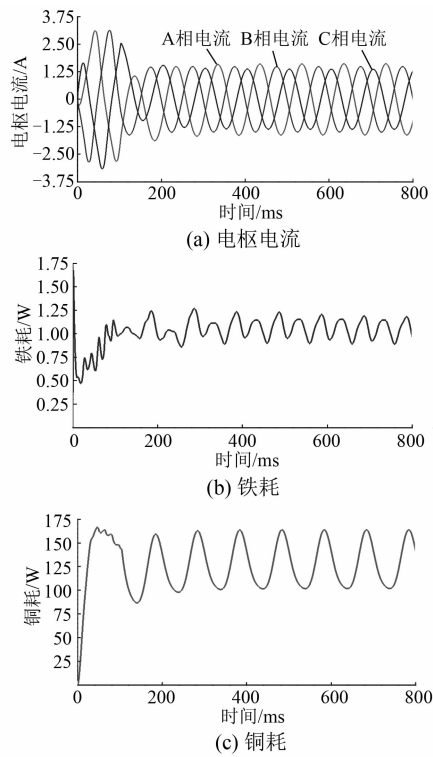


图4 电枢电流 1.5 A 时电机的损耗仿真结果

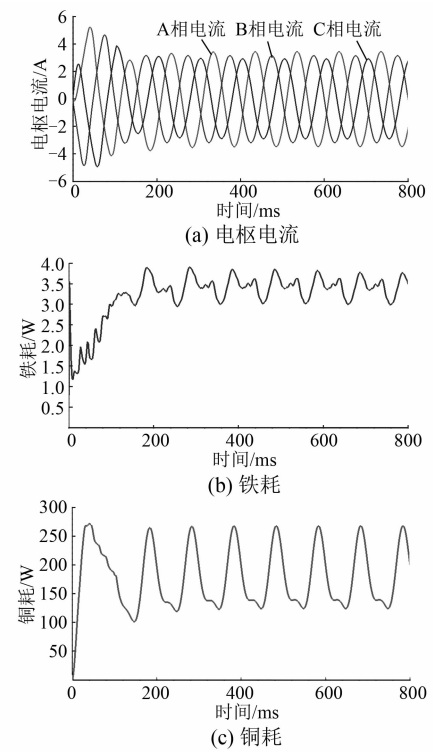


图5 电枢电流 3.0 A 时电机的损耗仿真结果

值为 1.06 W。通入 3.0 A 电枢电流时,铁耗波动范围为 2.9~4.7 W,平均值为 3.42 W。

由式(9) 电流变化引起铜耗变化,铜耗与电流的平方成正比。电枢电流为 0 A 时,电机铜耗仅为励磁绕组产生,铜耗曲线变化与图 3(a) 的励磁电流曲线一致,电机稳定时,铜耗变化范围为 105~118 W,平均值为 113.63 W。当电枢绕组分别通入 1.5、3.0 A 的三相对称交流电时,损耗也产生波动。电机稳定时,通入 1.5 A 电枢电流,电机铜耗波动范围为 90~165 W,有限元计算平均值为 129.52 W。通入 3.0 A 电枢电流时,铜耗波动范围为 120~260 W,有限元计算平均值为 203.2 W。从表 3 可以看出,损耗的有限元仿真值与损耗的计算值误差较小。

表3 损耗计算值与有限元仿真值比较

电流/A	损耗	计算值/W	仿真值/W
0	铁耗	0.200 0	0.002 4
	铜耗	112.50	113.63
1.5	铁耗	0.98	1.06
	铜耗	135.50	129.52
3.0	铁耗	3.04	3.42
	铜耗	206.19	203.20

生热率表示单位面积内产生的功率。通过上文磁场计算得到的各单元损耗,作为生热率施加到热场中相应模型上。电机在 3 种电枢电流作用下的生成热如图 6 所示。

本文使用有限元磁热耦合分析方法中的单向耦合,即先通过电磁软件分别计算电机中的铜耗、

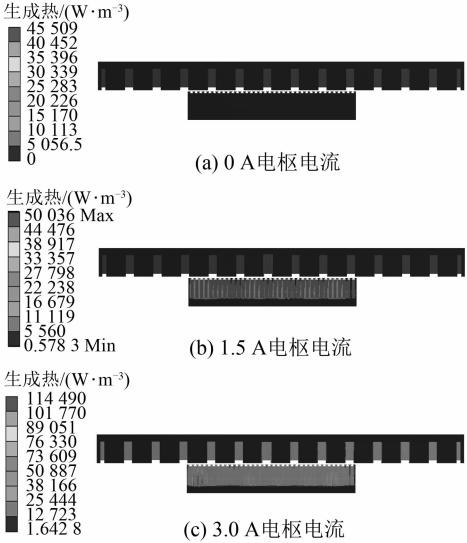


图6 电机的生成热仿真结果

铁耗,再将损耗导入到温度场软件中,对电机温度场进行有限元仿真^[18-19]。

前文已经建立了电机的有限元模型,计算得到了电机的热源、各材料属性、边界面的散热系数。假设电机周围空气温度为 25 ℃,且温度恒定。利用有限元软件对在电枢电流为 0、1.5、3.0 A 不同运行状态下的电机进行稳态温度场仿真,结果如图 7 所示。

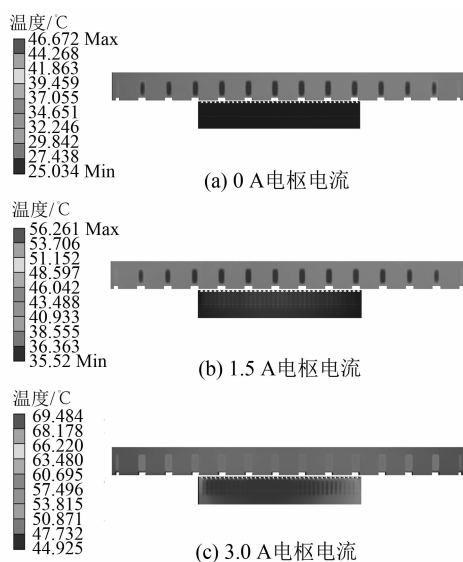


图 7 电机的温度仿真结果

通过图 7 可以看出,随着电枢电流增大,电机损耗增大,电机温度整体升高。电机各部分温度并不相同。在电枢电流为 0 和 1.5 A 时,励磁绕组损耗大于电枢绕组损耗,电机定子温度整体高于转子,电机温度峰值在励磁绕组部分,分别为 46、56 ℃。通入 3 A 电枢电流时,电枢绕组损耗大于励磁绕组,虽然对流换热系数增大,但转子温度高于定子,最高温为 69 ℃。在电机运行过程中,槽内的温度比齿的温度高,电机中部的温度较高,电机两边温度逐渐降低,最后通过电机外壁向周围空气对流散热。

6 结 语

(1) 本文对用于驱动数控机床磁悬浮平台的可控励磁直线磁悬浮直线电机结构及工作原理进行了分析,建立该电机的二维温度场热传导和热对流的数学模型,并对电机各部分的损耗进行计算及仿真,计算值与仿真结果基本一致,并分析了

损耗变化趋势及原因。

(2) 确定电机不同材料的导热系数,给出对流换热系数与空气流速之间的解析表达式,得到通入不同电枢电流时的对流换热系数,并分析了该电机中的主要热源。

(3) 本文分析并提出了电枢电流对可控励磁直线磁悬浮直线电机内部发热问题的影响,采用 ANSYS 有限元软件,建立了二维温度场模型,对电机在电枢电流为 0、1.5、3.0 A 时的模型分别进行稳态温度场计算,得到电机稳态的温度分布及变化规律。根据计算结果发现,发热主要集中在绕组处,温度随电枢电流的增加而增高,温度场计算数据为电机设计以及通风散热提供依据。

【参考文献】

- [1] 耿志慧,马宏忠,王刚. 混合磁悬浮系统电磁装置的温度计算与降温处理[J]. 电工电能新技术, 2013,32(4): 59.
- [2] 李争,岳非弘,王蕾永,等. 无铁心永磁同步直线电机电磁-热-应力耦合分析[J]. 微电机,2019,52(4): 1.
- [3] 周茜茜,黄勇. 无刷励磁同步发电机温度场仿真分析[J]. 电机技术,2017(2): 31.
- [4] MORIMOTO S, SANADA M, TAKEDA Y. Wide-speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high-performance current regulator [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994,30(4): 920.
- [5] KIM J M, SUL S K. Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997,33(1): 43.
- [6] 蓝益鹏,王靖腾. 可控励磁直线同步电动机滑模控制的研究[J]. 制造技术与机床,2018(11): 60.
- [7] 魏永田,孟大伟,温嘉斌. 电机内热交换[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [8] 汪文博. 永磁同步电机的热路模型研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [9] INCROPERA F P, DEWITT D P, BERGMAN T L, 等. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石,叶宏,译. 北京:化学工业出版社,2007.
- [10] 刘成柱. ANSYS Workbench 17.0 热力学分析实例演练[M]. 北京:机械工业出版社,2017.
- [11] 黄广霞. 永磁直线同步电动机温度场的计算[D]. 焦作:河南理工大学,2007.

(下转第 86 页)

变换时,矢量角补偿的模型预测电流控制不仅响应速度快,且具有更好的动态控制效果。

4 结 语

本文针对微电网运行稳定性提出储能配置和逆变器预测控制方案。储能电池配合 PV,可最大限度消除波动光伏功率的影响,稳定直流母线电压。并网逆变器采用模型预测控制,逆变器输出电流作为成本函数控制量,并使用矢量角补偿法对预测过程进行延时补偿,提高了电流跟踪的收敛速度。对比分析传统控制和模型预测控制的电压电流响应,仿真结果显示所提方案在负载和光伏功率波动情况下,能提高直流母线电压稳定性,减小并网电流畸变率。

【参考文献】

- [1] 李一琳,董萍,刘明波,等. 基于有限时间一致性的直流微电网分布式协调控制[J]. 电力系统自动化,2018,42(16): 96.
- [2] 刘舒,李正力,王翼,等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(3): 78.
- [3] KHULE S S,UGALE P D, MOHOD S W. Microgrid stability issues and PI control technique [C] //2018 International Conference on Information, Communication, Engineering and Technology (ICICET),2018.
- [4] KWON M, CHOI S. Control scheme for autonomous and smooth mode switching of bidirectional DC-DC converters in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2018,33(8): 7094.
- [5] 王擎宇,卢振坤,文国富,等. 应用于超级电容储能系统的双向 DC /DC 变换器混沌控制方法研究[J]. 电机与控制应用,2019,46(12): 81.
- [6] 宁佩. 30 kW 光伏并网逆变器的研究与设计[D]. 广州: 广东工业大学,2019.
- [7] 柳志飞,杜贵平,杜发达. 有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势[J]. 电工技术学报,2017,32(22): 58.
- [8] JIN T, SHEN X, SU T, et al. Model predictive voltage control based on finite control set with computation time delay compensation for PV systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2019,34(1): 330.
- [9] 陆治国,王友,廖一茜. 基于光伏并网逆变器的一种矢量角补偿法有限控制集模型预测控制研究[J]. 电网技术,2018,42(2): 548.
- [10] SHAN Y, HU J, GUERRERO J M. A model predictive power control method for PV and energy storage systems with voltage support capability [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(2): 1018.
- [11] 程俊,肖先勇,马俊鹏,等. 三相储能型准 Z 源并网逆变器有限开关序列模型预测直接功率控制[J]. 电网技术,2020,44(5): 1647.
- [12] 岳改丽,徐志财. 基于扰动观察与模糊控制相结合的 MPPT 算法[J]. 电源技术,2017,41(1): 115.
- [13] 邱革非,张春刚,仲泽坤,等. 基于扰动观察法和电导增量法的光伏发电系统 MPPT 算法研究综述[J]. 中国电力,2017,50(3): 154.
- [14] SHAN Y, HU J, CHAN K W, et al. Model predictive control of bidirectional DC-DC converters and AC/DC interlinking converters; a new control method for PV-wind-battery microgrids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2019,10(4): 1823.
- [15] 金楠,胡石阳,崔光照,等. 光伏并网逆变器有限状态模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(增刊1): 190.
- [16] 王友. 三相电压型逆变器的有限控制集模型预测控制研究及应用[D]. 重庆: 重庆大学,2018.
- [12] 杨丽伟. 牵引电机的温度场分析[D]. 北京: 北京交通大学,2007.
- [13] 丁文,周会军,鱼振民. 基于 ANSYS 的开关磁阻电机温度场分析[J]. 微电机,2005,38(5): 13.
- [14] 陈世坤. 电机设计[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社,1997.
- [15] 孔春祥,付敏. 水轮发电机转子中部最热段三维温度场的有限元计算[J]. 哈尔滨科学技术大学学报,1996,1(4): 53.
- [16] 焦晓燕. 无刷双馈电机二维全域多工况温度场的分析与计算[D]. 重庆: 重庆大学,2013.
- [17] 陈中成. 可控励磁直线磁悬浮同步电动机的优化设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学,2018.
- [18] 冯良坤. 高推力密度圆筒型永磁直线电机温度场分析及改进设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学,2019.
- [19] 智淑亚,吴洪兵. 数控进给伺服系统摩擦补偿控制仿真[J]. 沈阳工业大学学报,2019,41(4): 361.

(上接第 59 页)